

На правах рукописи

АНИСИМОВ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
СИНТЕЗА, ОПТИМИЗАЦИИ И НАСТРОЙКИ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иваново 2013

Работа выполнена на кафедре “Электроника и микропроцессорные системы” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ).

Научный консультант

Тарарькин Сергей Вячеславович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты:

Гайдук Анатолий Романович – доктор технических наук, профессор; Южный федеральный университет (Таганрогский кампус), профессор кафедры “Системы автоматического управления”;

Староверов Борис Александрович – доктор технических наук, профессор; ФГБОУ ВПО “Костромской государственной технологической университет”, профессор кафедры “Автоматика и микропроцессорная техника”;

Виноградов Анатолий Брониславович – доктор технических наук, доцент; ФГБОУ ВПО “Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”, профессор кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок”

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО “Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева”

Защита диссертации состоится « 15 » ноября 2013 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба высылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел (4932) 38-57-12. E-mail: uch_sovet@ispu.ru

Автореферат разослан « » августа 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.02
д. т. н, профессор

В. В. Тютиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время особое значение приобретает совершенствование технологических процессов и оборудования в различных отраслях промышленности. Необходимым условием этого является повышение качества управления оборудованием, требующее разработки и применения эффективных средств автоматизации.

Наиболее перспективными с точки зрения автоматизации управления считаются машины непрерывного действия, объединяемые в поточные линии в текстильной, целлюлозно-бумажной, химической и металлургической промышленности, а также широко распространенные в различных отраслях металлорежущие станки, обрабатывающие центры и роботы-манипуляторы.

Эффективным инструментом управления технологическими параметрами промышленного оборудования являются электромеханические системы (ЭМС), включающие в себя силовой преобразователь, электродвигатель, механическую передачу и рабочий орган машины. Однако до сих пор системы автоматического управления (САУ) промышленными установками в большинстве случаев строятся по каскадному принципу на основе типовых регуляторов низкого порядка (П, ПИ, ПИД типов).

Повышение требований к качеству управления требует учета влияния более тонких эффектов на работу технологического оборудования, что в свою очередь приводит к усложнению математических моделей рассматриваемых объектов. В этих условиях влияние скрытых и явных факторов сложности математических моделей объектов снижает эффективность применения САУ каскадной структуры на базе типовых регуляторов низкого порядка.

Современная теория управления предлагает разработчику ряд методов синтеза САУ на основе регуляторов состояния повышенного порядка, позволяющих обеспечить высокое качество управления сложными объектами. К числу подобных управляющих устройств относятся безынерционные регуляторы состояния (РС), полиномиальные регуляторы (ПР) и регуляторы с наблюдателями состояния (РНС). Наиболее эффективными методами синтеза САУ при этом считаются модальное управление, оптимальное управление, а также интеллектуальные подходы.

Вместе с тем регуляторы состояния, синтезируемые методами современной теории управления, до сих пор не получили широкого распространения в промышленности. Очевидно, имеется ряд причин как объективного, так и субъективного характера, приводящих к подобному разрыву между теорией и практикой автоматического управления.

Важную роль в связи с этим играет проблема обеспечения робастности (параметрической грубости) синтезируемых САУ, то есть сохранения устойчивости и качества управления в условиях вариации параметров объекта. Попытки решения данной проблемы в рамках оптимизационного подхода, а также интервальных модификаций метода модального управления связаны с определенными трудностями. Поэтому весьма актуальной задачей является

разработка методов структурного и параметрического синтеза робастных САУ с регуляторами состояния.

Синтез САУ с регуляторами состояния методом модального управления проводится на основе линеаризованной модели объекта и не позволяет учесть влияния нелинейных факторов, ограничения координат, возмущающих воздействий. Вместе с тем применение методов оптимизации осложняется проблемой формирования критериев оптимальности, большинство которых носит косвенный характер. Поэтому необходима разработка методов параметрической оптимизации робастных систем на основе комплексных критериев, включающих в себя прямые показатели качества управления технологическими объектами.

Применение САУ с регуляторами состояния, обладающими относительно большим числом степеней свободы, осложняется проблемой настройки подобных систем. Большинство известных методов настройки требует проведения множества экспериментов на объекте управления и не гарантирует сходимость применяемых поисковых алгоритмов. В связи с этим необходима разработка методов, обеспечивающих решение задачи настройки регуляторов состояния в режиме реального времени при минимальном количестве натуральных экспериментов.

Применение методов структурно-параметрического синтеза, оптимизации и настройки САУ с регуляторами состояния требует разработки соответствующих программных средств, поскольку решение этих задач в ручном режиме малоэффективно, а подчас и невозможно.

В соответствии с изложенным выше **целью** данной работы является развитие методов робастного синтеза, параметрической оптимизации и автоматической настройки линейных и линеаризованных САУ в направлении обеспечения статических и динамических показателей качества управления технологическими объектами, а также разработка реализующих эти методы аппаратно-программных средств.

Достижение поставленной цели требует решения **основных задач**, заключающихся:

- в определении комплекса требований, предъявляемых к САУ технологическими объектами, выявлении усложняющих разработку таких систем факторов и анализе эффективности методов структурно-параметрического синтеза, оптимизации и настройки регуляторов состояния;

- в выявлении основных факторов, оказывающих влияние на параметрическую грубость САУ, синтезируемых методом модального управления, и выработке рекомендаций по рациональному выбору типа, структуры и параметров регуляторов состояния, позволяющих обеспечить робастность подобных систем;

- в разработке новых вариантов структур систем управления с регуляторами состояния основных типов, позволяющих обеспечить высокую параметрическую грубость и помехоустойчивость при заданных динамических свойствах САУ;

– в разработке и исследовании эффективности методов оптимизации САУ с регуляторами состояния, основанных на применении комплексных критериев оптимальности, включающих в себя прямые показатели качества управления технологическими объектами;

– в разработке и исследовании новых методов автоматической настройки САУ с регуляторами состояния, обеспечивающих достижение заданного качества управления при минимальном количестве экспериментов на реальном технологическом объекте;

– в создании комплекса аппаратно-программных средств, реализующих разработанные методы структурно-параметрической оптимизации и автоматической настройки САУ с регуляторами состояния, и экспериментальном исследовании эффективности этих средств.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе используются методы пространства состояний ТАУ, математический аппарат алгебры матриц и передаточных функций, методы робастного и оптимального управления. Исследование систем управления проводится методами структурного анализа и имитационного моделирования на ЭВМ, а также физического моделирования с использованием экспериментального оборудования.

Достоверность результатов основана на корректном использовании современных методов ТАУ и подтверждается совпадением полученных аналитических решений с результатами математического моделирования, а также экспериментальных исследований разработанных вариантов САУ и методов автоматической настройки регуляторов состояния.

Научная новизна работы определяется разработкой и реализацией новых подходов к решению проблем проектирования и настройки систем управления технологическими объектами:

1. Выявлены факторы, влияющие на параметрическую грубость систем с безынерционными РС, динамическими ПР и с наблюдателями состояния различной структуры, синтезируемых методом модального управления, и установлено, что границы областей робастности САУ для одного и того же объекта с различными типами регуляторов состояния могут как совпадать, так и существенно отличаться.

2. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных с точки зрения параметрической грубости САУ типа, структуры и параметров регулятора состояния, основанные на сопоставлении структуры объекта управления с каноническими формами управляемости (КФУ) и наблюдаемости (КФН) путем оценки норм матриц преобразования координат объекта.

3. Разработаны рекомендации по снижению чувствительности САУ с наблюдателями состояния к вариациям параметров объекта управления и собственных коэффициентов регулятора, основанные на рациональном выборе структуры и параметров РНС, а также темпов переходных процессов в системе, синтезируемой методом модального управления.

4. Предложено структурное решение и соответствующая методика параметрического синтеза, позволяющая расширить и сделать непрерывной зону

параметрической грубости систем управления с безынерционными РС, основанная на введении в структуру САУ дополнительных гибких обратных связей по координатам состояния.

5. Предложена методика параметрической оптимизации регуляторов состояния на основе комплексных критериев качества САУ, включающих в себя нормированные показатели быстродействия, точности и энергетических затрат, а также параметрической грубости и помехоустойчивости, обеспечивающая достижение компромисса между основными техническими требованиями к системе управления.

6. Разработаны методы автоматической настройки систем управления с регуляторами состояния базовых типов, основанные на применении эталонной модели САУ, а также снижении размерности задачи оптимизации и расчете параметров управляющего устройства при каждой итерации, позволяющие повысить эффективность поисковых алгоритмов оптимизации в режиме реального времени.

7. Предложен интеллектуальный метод настройки САУ, основанный на идентификации параметров объекта управления при помощи искусственной нейронной сети с последующей коррекцией параметров регулятора методом модального управления, позволяющий сократить длительность настройки до минимально возможного значения.

Научная ценность работы состоит в возможности применения полученных теоретических результатов, а именно: методов структурно-параметрического синтеза, параметрической оптимизации на основе комплексных критериев качества и автоматической настройки в режиме реального времени робастных САУ с регуляторами состояния при разработке систем управления технологическими объектами различного назначения, а также другими динамическими объектами.

Практическая ценность работы состоит:

1. В разработке методов оценки на начальном этапе проектирования параметрической грубости вариантов систем автоматического управления с регуляторами состояния различных типов и структуры.

2. В разработке методики структурно-параметрического синтеза робастных систем управления с безынерционными и динамическими регуляторами состояния, а также с наблюдателями состояния на основе методов модального управления.

3. В разработке методики параметрической оптимизации САУ с регуляторами состояния различных типов на основе комплексных критериев оптимальности, включающих в себя прямые показатели качества управления.

4. В разработке алгоритмов автоматической настройки систем управления с регуляторами состояния, позволяющих обеспечить достижение результата в режиме реального времени.

5. В создании прикладного программного обеспечения, позволяющего проводить анализ параметрической грубости, оптимизацию и настройку систем управления с регуляторами состояния различных типов.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Метод обеспечения параметрической грубости систем управления, основанный на выборе оптимального типа и структуры регулятора состояния путем оценки норм матриц преобразования координат объекта, а также на формировании темпа переходных процессов в САУ с учетом соответствующих областей робастности.

2. Методика параметрической оптимизации регуляторов состояния на основе комплексных критериев качества САУ, обеспечивающая достижение компромисса между основными техническими требованиями к системе управления.

3. Методы автоматической настройки систем управления с регуляторами состояния, основанные на применении эталонной модели САУ и на снижении размерности задачи оптимизации, позволяющие повысить эффективность поисковых алгоритмов в режиме реального времени.

4. Интеллектуальный метод настройки САУ, основанный на идентификации параметров объекта управления при помощи искусственной нейронной сети с последующей коррекцией параметров регулятора методом модального управления.

В соответствии с **формулой специальности 05.13.06** – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, включающей методологию исследования и проектирования, формализованное описание и алгоритмизацию, оптимизацию и имитационное моделирование, внедрение и эксплуатацию АСУ ТП в диссертационной работе исследуются методы структурного и параметрического синтеза, оптимизации и автоматической настройки систем управления наиболее распространенными технологическими объектами.

Личное участие соискателя. Соискателем лично, при участии научного консультанта, проведены исследования, составляющие научную новизну и практическую ценность представленной работы, в том числе разработка и исследование эффективности методов структурно-параметрического синтеза, оптимизации и настройки систем управления с регуляторами состояния.

Соискатель принимал непосредственное участие в разработке экспериментального оборудования и проведении экспериментов по исследованию эффективности предложенных методов автоматической настройки САУ.

Связь с целевыми программами:

– с аналитической ведомственной целевой программой “Развитие научного потенциала высшей школы” за 2006-2008 годы по проекту № 2.1.2/4285 “Развитие теории робастного модального управления для решения задач автоматизации технологических объектов”;

– с аналитической ведомственной целевой программой “Развитие научного потенциала высшей школы” за 2009-2010 годы по проекту № 2.1.2/4285 “Развитие теории робастного координирующего управления многосвязными мехатронными объектами”;

– с федеральной целевой программой “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” за 2009-2011 годы по теме “Создание энерго-сберегающих электромехатронных модулей и систем на основе конечно-элементного компьютерного моделирования и синергетического управления в реальном времени” в соответствии с государственным контрактом № 02.74.11.0067 от 15.06.2009 года;

– с грантами Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ России НШ – 5921.2008.8, 4108.2010.8 и 1559.2012.8 за 2008-2013 годы.

Использование результатов работы в учебном процессе

Разработанные на основе результатов исследований программные комплексы “Sputnik”, “SkyEyes” и “AutoTuner”, предназначенные для синтеза, оптимизации и настройки САУ с регуляторами состояния, внедрены на кафедре “Электроника и микропроцессорные системы” ИГЭУ.

Основные результаты проведенных исследований использовались при разработке учебных курсов “Теория нелинейных и дискретных систем управления”, “Современные проблемы автоматизации и управления”, “Идентификация объектов и систем управления” для студентов, обучающихся по направлениям 210100 “Электроника и микроэлектроника” и 220400 “Управление в технических системах”.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались:

– на I, II, III и IV Всероссийских научно-технических конференциях “Проблемы разработки перспективных нано- и микроэлектронных систем” (Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва, 2005, 2006, 2008 и 2010 годы);

– на Международной научно-технической мультиконференции “Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники” (НИИ МВС ЮФУ, г. Таганрог, 2007 год);

– на 2-й и 3-й Всероссийских научно-технических мультиконференциях по проблемам управления МКПУ-2008 и МКПУ-2010 (Концерн “ЦНИИ Электроприбор”, г. Санкт-Петербург);

– на Международной научно-технической мультиконференции “Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники” (НИИ МВС ЮФУ, г. Таганрог, 2009 год);

– на 4-й Всероссийской научно-технической мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2011 (НИИ МВС ЮФУ, г. Таганрог, 2011 год);

– на VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 (ФГБОУ ВПО ИГЭУ, г. Иваново, 2012 год);

– на Международных научно-технических конференциях “Состояние и перспективы развития электротехнологий (Бенердосовские чтения)” (ФГБОУ ВПО ИГЭУ, г. Иваново, 2005-2011 годы);

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 работ, в том числе 10 статей в журналах и сборниках трудов, входящих в перечень изданий, ре-

комендованных ВАК РФ, две статьи в журнале “Известия РАН. Теория и системы управления”, одно учебное пособие. Получены свидетельства о государственной регистрации 3 программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 224 наименования, и 12 приложений. Работа изложена на 235 страницах машинописного текста, содержит 91 рисунок и 31 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена исследованию проблем, возникающих при разработке и практической реализации систем управления технологическими объектами на основе регуляторов состояния.

Проведен анализ особенностей управления наиболее распространенными в различных отраслях промышленности технологическими объектами, в том числе поточными линиями, металлорежущими станками и роботами-манипуляторами, содержащими ЭМС в своем составе.

Установлено, что к системам управления ЭМС в составе технологического оборудования предъявляются жесткие требования по быстродействию и точности регулирования скорости и перемещения рабочих органов машин, причем наблюдается тенденция к возрастанию этих требований.

Обеспечение требований, предъявляемых к качеству управления ЭМС, осложняется резонансными свойствами механизмов, взаимным влиянием координат состояния, параметрической неопределенностью реальных объектов, воздействием сигнальных возмущений и нелинейными факторами.

В этих условиях становится целесообразным применение в САУ технологическими объектами регуляторов состояния, эффективность которых обусловлена повышенным числом степеней свободы. Подобные управляющие устройства реализуются в форме безынерционных РС с обратной связью по вектору состояния объекта или в форме регуляторов “входа-выхода” – динамических ПР и РНС.

Разработка систем управления с безынерционными РС, а также вариантов с РНС проводится на основе векторно-матричной модели объекта в пространстве состояний:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}, \quad (1)$$

где $\mathbf{u} = y_3 - \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}$ – управляющее воздействие на объект; s – комплексная переменная Лапласа; y_3, y – входной и выходной сигналы; \mathbf{x} – вектор координат состояния объекта; \mathbf{A}, \mathbf{B} и \mathbf{C} – матрицы состояния, входа и выхода объекта с размерностями $n \times n, n \times 1, 1 \times n$; \mathbf{K} – матрицы коэффициентов РС.

При синтезе систем динамическими ПР обычно используется описание объекта в форме передаточной функции:

$$H_o(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (2)$$

где m и n – степени полиномов $B(s)$ и $A(s)$ соответственно. Полиномы числителя и знаменателя передаточной функции ПР представляются следующим образом: $R(s) = r_k s^k + \dots + r_1 s + r_0$; $C(s) = c_l s^l + \dots + c_1 s + c_0$.

Вместе с тем разработка и практическое применение САУ технологическими объектами с регуляторами состояния с использованием методов как оптимального, так и модального управления осложняется следующими обстоятельствами:

- проблемой обеспечения параметрической грубости (робастности) синтезируемых систем;
- проблемой выбора оптимального типа и структуры применяемого регулятора состояния;
- проблемой параметрической оптимизации регулятора с учетом комплекса требований, предъявляемых к качеству управления;
- проблемой автоматической настройки системы с регулятором состояния на объекте управления.

Проблема синтеза робастных (параметрически грубых) систем управления технологическими объектами с регуляторами состояния является весьма сложной. Ни один из известных методов синтеза робастных САУ, основанный на принципах как оптимального, так и модального управления, не обеспечивает требуемое качество регулирования в условиях параметрической неопределенности реальных объектов.

Применение интервального метода модального управления придает процедуре синтеза робастной САУ известную математическую строгость. Однако формирование желаемого интервального полинома представляет собой отдельную, достаточно сложную задачу. Кроме того, зачастую трудно определить диапазоны изменения параметров объекта управления.

Минимаксные методы оптимизации в частотной области H_2, H_∞, l_1 и l_2 , а также μ - синтез могут приводить к ухудшению динамических свойств системы по каналу управления и к формированию неоправданно сложных регуляторов. При использовании 2-Риккати подхода и LMI-методов возникает, кроме того, традиционная для оптимизационных задач проблема выбора критерия оптимальности.

Актуальность настройки систем управления с регуляторами состояния обусловлена погрешностями идентификации, а также изменениями параметров технологических объектов в процессе эксплуатации. Настройка САУ на объекте управления проводится в режиме реального времени, что предъявляет повышенные требования к быстродействию и сходимости применяемых алгоритмов.

Методы настройки, включающие в себя процедуру идентификации объекта управления, позволяют сократить до минимума число экспериментов на объекте и тем самым снизить длительность настройки. Однако при воздействии помех погрешности оценок параметров объекта возрастают, что приводит к ухудшению качества настройки.

Методы непосредственной настройки, основанные на применении численных алгоритмов оптимизации, являются более помехоустойчивыми по сравнению с идентификационными. Вместе с тем эти методы, как правило, требуют значительного количества итераций и не гарантируют успешного завершения процесса поиска оптимума.

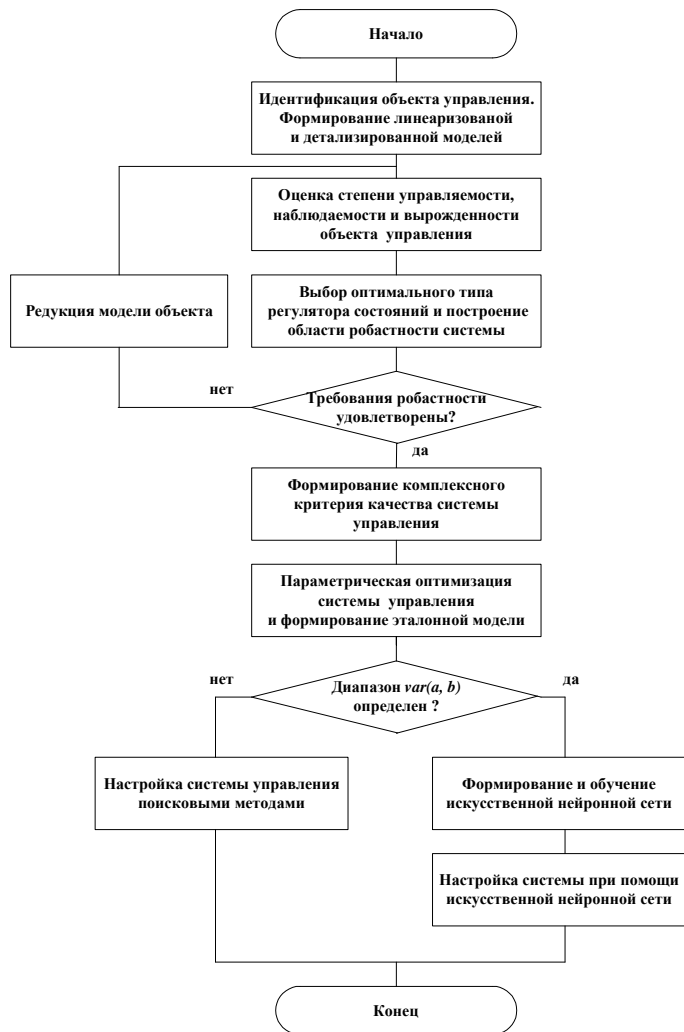


Рис. 1

В целях решения указанных проблем была разработана методика структурно-параметрического синтеза, оптимизации и настройки САУ с регулято-

рами состояния (рис. 1), основанная на сочетании принципов модального и оптимального управления, включающая следующие основные этапы:

- выбор оптимальной структуры регулятора состояния, обеспечивающей робастные свойства САУ, с использованием матричных критериев управляемости, наблюдаемости и вырожденности объекта управления;
- параметрическая оптимизация САУ на основе комплексного критерия качества с использованием поисковых генетических алгоритмов на основе детализированной цифровой модели объекта управления;
- настройка регуляторов состояния на реальном объекте управления с использованием эталонной модели САУ, сформированной на этапе оптимизации. Если диапазон изменения параметров объекта $var(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ известен, а влияние помех несущественно, для ускорения настройки системы применяется искусственная нейронная сеть (ИНС). В противном случае используются поисковые алгоритмы настройки, основанные на численных методах оптимизации.

Вторая глава диссертации посвящена разработке принципов структурного и параметрического синтеза робастных систем модального управления с регуляторами состояния. На основе сформулированных условий параметрической грубости в данной главе предложены рекомендации по рациональному выбору структуры и параметров регуляторов состояния.

Синтезированные методами модального управления САУ обладают робастными свойствами при соблюдении определенных условий:

1. Система имеет гурвицев характеристический полином при номинальных параметрах объекта управления.
2. В системе не происходит сокращение нулей и полюсов передаточной функции объекта управления с нулями и полюсами регулятора.
3. Регулятор, являясь безынерционным или минимально-фазовым звеном, не формирует положительных обратных связей по координатам состояния, выходной координате или ее производным.

Первое условие робастности обеспечивается в рамках метода модального управления заданием желаемого характеристического полинома $D(s) = s^p + d_{p-1}s^{p-1} + \dots + d_1s + d_0$, при котором достигается устойчивость и необходимое качество переходных процессов при номинальных параметрах САУ.

Вычисление вектора параметров $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ безынерционного РС для одноканальных объектов управления (1) выполняется по формуле

$$\mathbf{K} = \bar{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{P}_U ; \quad \mathbf{P}_U = \bar{\mathbf{U}} \cdot \mathbf{U}^{-1} , \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{K}} = [d_0 - a_0, d_1 - a_1, \dots, d_{n-1} - a_{n-1}]$ – матрица коэффициентов РС для объекта, представленного в КФУ при $p = n$; $\bar{\mathbf{U}} = [\bar{\mathbf{V}} \quad \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{V}} \quad \bar{\mathbf{A}}^2\bar{\mathbf{V}} \quad \dots \quad \bar{\mathbf{A}}^{n-1}\bar{\mathbf{V}}]$,

$\mathbf{U} = [\mathbf{V} \quad \mathbf{A}\mathbf{V} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{V} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{V}]$ – матрицы управляемости объекта соответственно в КФУ и в реальных координатах

Второе условие робастности для систем с динамическими ПР и передаточной функцией объекта (2) обеспечивается путем составления и решения уравнения синтеза в форме:

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s), \quad (4)$$

при соответствующем выборе степеней полиномов регулятора $k = \deg R(s)$, $l = \deg C(s)$ и $p = \deg D(s)$. Эти значения степеней полиномов определяются следующими выражениями: $k = n - 1$, $p = n + l$, $l = m + f - 1$ при $m > 0$ и $l = f$ при $m = 0$, где f – степень, определяющая фильтрующие свойства ПР.

Третье условие робастности при проектировании систем с регуляторами «входа-выхода» обеспечивается путем размещения формируемой динамической характеристики $d_0 / D(s)$ в области параметрической грубости, которая лежит в интервале между характеристиками звеньев $b_0 / B(s)$ и $a_0 / A(s)$.

Область параметрической грубости САУ с безынерционным РС носит более сложный характер и определяется путем аналитического или численного решения неравенств: $k_1 > 0$; $k_2 > 0$; ... $k_n > 0$ при вариации значения среднегеометрического корня Ω_0 характеристического полинома системы $D(s)$.

Проведенные исследования для объектов второго и более высоких порядков позволяют выявить основные факторы, влияющие на конфигурацию областей параметрической грубости систем управления с РС:

1. *Структура объекта управления.* Наименьшее влияние нулей проявляется в структурах объекта, соответствующих КФУ или близких к ней, а наибольшее – в структурах, соответствующих КФН.

2. *Взаимное положение нулей и полюсов объекта.* Чем дальше друг от друга находятся области расположения нулей и полюсов объекта, тем шире оказывается соответствующая область робастности САУ.

3. *Различия степеней и видов распределения корней полиномов $B(s)$, $A(s)$ и $D(s)$.* Они обуславливают конкретные выражения неравенств, определяющих

границы зон параметрической грубости САУ.

Область достижения параметрической грубости системы управления с РС в зависимости от структуры объекта управления может оказаться как шире, так и уже соответствующей области системы с динамическим ПР, или совпадать с ней.

В качестве примера на рис. 2 приведены области параметрической грубости системы управления с безынерционным РС для объекта со структурой, соответствующей КФН, и переда-

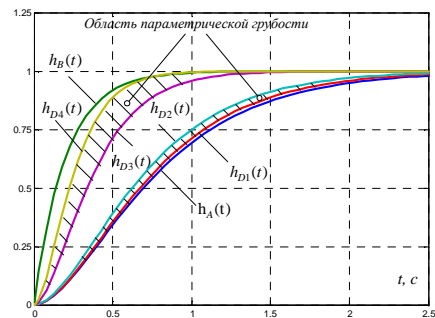


Рис. 2

точной функцией вида $H_o(s) = (s + 5) / (s^2 + 5s + 6)$. В данном случае с точки зрения параметрической грубости вариант системы с безынерционным РС существенно уступает варианту с ПР.

Выявленные различия областей робастности для систем с РС и с регуляторами «входа-выхода» указывают на возможности не только параметрической, но и структурной оптимизации САУ на ранних стадиях проектирования по критерию параметрической грубости.

С учетом выявленных закономерностей, критерием выбора наиболее робастного варианта системы модального управления служит близость структуры объекта к КФУ или к КФН. При этом для объектов, близких по своим свойствам к КФУ, с точки зрения обеспечения параметрической грубости более целесообразно применение РС. В то же время для объектов, близких к КФН, более эффективными могут оказаться системы с регуляторами «входа-выхода» – динамическими ПР и РНС.

На ранних этапах проектирования САУ для оценки указанных свойств объектов управления предлагается использовать нормы матриц \mathbf{P}_U и \mathbf{P}_V преобразования координат:

$$\|\mathbf{P}_U\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \left(\sum_{i=1}^n |u_{ij}| \right); \quad \|\mathbf{P}_V\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \left(\sum_{i=1}^n |v_{ij}| \right),$$

где u_{ij} , v_{ij} – элементы матриц \mathbf{P}_U и \mathbf{P}_V соответственно, находящиеся на пересечении строки i и столбца j ; $\mathbf{P}_V = \tilde{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{V}^{-1}$ – матрица преобразования из КФН в реальные координаты объекта; $\tilde{\mathbf{V}} = [\tilde{\mathbf{C}}^T \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{C}}^T (\tilde{\mathbf{A}}^T)^2 \tilde{\mathbf{C}}^T \dots (\tilde{\mathbf{A}}^T)^{n-1} \tilde{\mathbf{C}}^T]$, $\mathbf{V} = [\mathbf{C}^T \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T (\mathbf{A}^T)^2 \mathbf{C}^T \dots (\mathbf{A}^T)^{n-1} \mathbf{C}^T]$ – матрицы наблюдаемости объекта, представленного в КФН и в реальных координатах.

Степень удаленности значений указанных норм от единицы отражает количественно уменьшение степени управляемости и наблюдаемости объекта управления в его реальных координатах состояния.

Поскольку матричные оценки носят предварительный характер, на последующих стадиях проектирования рекомендуется выполнять уточнение потенциальных возможностей конкретного варианта САУ путем построения соответствующей области параметрической грубости.

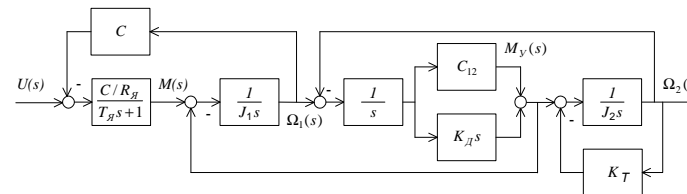


Рис. 3

Таблица 1

Вариант ЭМС	Норма $\ P_U\ _1$	Норма $\ P_V\ _1$	Область робастности САУ с РС, рад/с	Область робастности САУ с ПР, рад/с
1-й	2,35	4270,4	$\Omega_o \in [6,78 ; 33,29]$	$\Omega_o \in [6,1 ; 11,8]$
2-й	515,99	6,281	$\Omega_o \in [3,86; 4,28] \cup [7,29; 2,58]$	$\Omega_o \in [3,0 ; 9,5]$

Предложенный подход к синтезу робастных САУ иллюстрируется на примере двухмассовой ЭМС, структура которой приведена на рис. 3. Как показывает анализ норм матриц преобразования координат, представленных в табл. 1, 1-й вариант двухмассовой ЭМС по своим свойствам приближается к КФУ, а 2-й – к КФН.

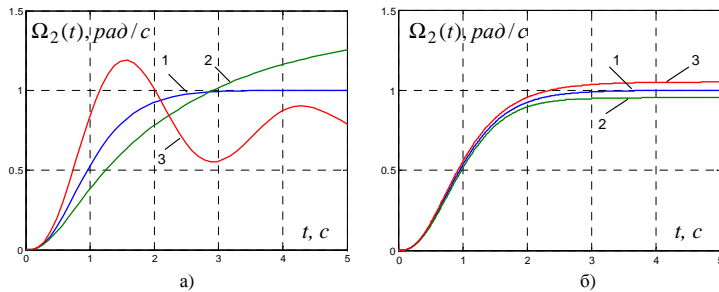


Рис. 4

Таким образом, для 1-го варианта двухмассовой ЭМС с точки зрения параметрической грубости синтезируемой САУ наиболее предпочтительно применение безынерционного РС, а для 2-го варианта ЭМС целесообразно применение ПР. Это подтверждается сопоставлением областей робастности для желаемого полинома Ньютона 4-го порядка (табл. 1), а также переходными характеристиками вариантов системы управления с РС (рис. 4, а) и с ПР (рис. 4, б).

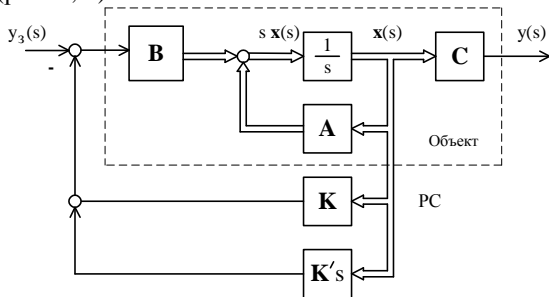


Рис. 5.

В целях расширения возможностей синтеза робастных САУ методом модального управления предлагается ввести в структуру системы с безынерционным РС гибкие обратные связи по производным координат состояния объекта (рис. 5). Такое решение позволяет

расширить и сделать непрерывной область параметрической грубости САУ при неблагоприятной структуре объекта управления.

Разработана методика синтеза систем управления с комбинированными РС, дополненными гибкими обратными связями, для одноканальных объектов, представляемых в пространстве состояний (1). Матрицы коэффициентов безынерционных и гибких обратных связей регулятора, $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ и $\mathbf{K}' = [k'_1, k'_2, \dots, k'_n]$ соответственно, первоначально определяются для объекта управления, представленного в КФУ. При этом желаемый характеристический полином замкнутой системы управления представляется в нормированной форме: $D(s) = s^n + d_{n-1}\Omega_o s^{n-1} + \dots + d_1\Omega_o^{n-1}s + \Omega_o^n$.

Матрица безынерционных связей регулятора $\bar{\mathbf{K}}$ рассчитывается для “ускоренного” полинома $D^*(s)$, размещенного в зоне параметрической грубости САУ, который отличается от $D(s)$ величиной $\Omega_o^* > \Omega_o$, методом модального управления (3). Матрица гибких обратных связей регулятора $\bar{\mathbf{K}}'$ определяется на основе выражений: $\bar{k}'_n = (\Omega_o^* / \Omega_o)^n - 1$; $\bar{k}'_{n-1} = d_{n-1}[\Omega_o(1 + \bar{k}'_n) - \Omega_o^*]$; \dots $\bar{k}'_1 = d_1[\Omega_o^{n-1}(1 + \bar{k}'_n) - \Omega_o^{n-1}]$.

Введение в структуру системы с РС дифференцирующих гибких обратных связей позволяет получить непрерывную зону параметрической грубости, а также повысить коэффициент петлевого усиления САУ. Это не только снижает статическую ошибку САУ, но и улучшает робастные свойства системы с РС ценой определенного повышения чувствительности к внешним возмущениям.

Третья глава диссертации посвящена особенностям структурного и параметрического синтеза робастных систем модального управления с регуляторами и наблюдателями состояния. Рассматриваются условия обеспечения низкой чувствительности систем с РНС как к вариациям параметров объекта управления, так и к вариациям параметров наблюдателя состояния.

Синтез робастных систем управления с наблюдателями состояния имеет свои особенности, поскольку РНС сочетают в себе свойства регуляторов состояния и регуляторов “входа-выхода”. Такие системы имеют дополнительные степени свободы в виде вариантов структуры наблюдателя, а также элементов матриц подстройки.

Расчет матрицы \mathbf{K}_M регулятора состояний выполняется на основе желаемого характеристического полинома $D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0$:

$$\mathbf{K}_M = \bar{\mathbf{K}}_M \cdot \mathbf{P}_{MU} ; \bar{\mathbf{K}}_M = [d_0 - a_0, d_1 - a_1, \dots, d_{n-1} - a_{n-1}] , \quad (5)$$

где $\mathbf{P}_{MU} = \bar{\mathbf{U}}_M \mathbf{U}_M^{-1}$ – матрица преобразования координат наблюдателя из КФУ в принятую форму его представления.

Расчет матрицы подстройки наблюдателя \mathbf{L} выполняется на основе желаемого характеристического полинома $D^*(s) = s^n + d_{n-1}^*s^{n-1} + \dots + d_1^*s + d_0^*$:

$$\mathbf{L} = \tilde{\mathbf{L}} \cdot \mathbf{P}_{MV}; \quad \tilde{\mathbf{L}} = [d_0^* - a_0, d_1^* - a_1, \dots, d_{n-1}^* - a_{n-1}], \quad (6)$$

где $\mathbf{P}_{MV} = \tilde{\mathbf{V}}_M \mathbf{V}_M^{-1}$ – матрица преобразования координат наблюдателя из КФН в принятую форму его представления.

Обеспечение низкой чувствительности системы с наблюдателем к вариациям параметров объекта достигается путем формирования темпа процессов управления и подстройки, при котором сохраняется минимально-фазовый характер передаточной функции РНС. При этом передаточная функция РНС от выхода объекта к управляющему входу может быть вычислена на основе матричной формулы:

$$H_{PHC}(s) = \frac{U(s)}{y(s)} = \mathbf{K}_M (\mathbf{I}_s - \mathbf{A}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{K}_M + \mathbf{L}^T \mathbf{C}_M)^{-1} \mathbf{L}^T,$$

где \mathbf{A}_M , \mathbf{B}_M и \mathbf{C}_M – матрицы состояния, входа и выхода наблюдателя с размерностями $n \times n$, $n \times 1$, $1 \times n$. Важно отметить, что значения параметров данной передаточной функции не зависят от формы представления наблюдателя, а определяются видом характеристических полиномов $D(s)$, $D^*(s)$ и значениями среднегеометрических корней Ω_o , Ω_n .

Как показывают исследования, при высоком темпе подстройки РНС область параметрической грубости САУ, в пределах которой коэффициенты передаточной функции положительны, приближается к соответствующей области ПР минимальной структуры.

Таким образом, для обеспечения низкой чувствительности системы с РНС к вариациям параметров объекта управления рекомендуется располагать желаемую динамическую характеристику $d_0/D(s)$ в пределах области различий характеристик звеньев $b_0/B(s)$ и $a_0/A(s)$.

Таблица 2

Вариант ЭМС	Области робастности систем с РНС при различных Ω_n , рад/с			Области робастности систем ПР, рад/с
	$\Omega_n = 35,0$	$\Omega_n = 75,0$	$\Omega_n = 105$	
1-й	$\Omega_o \in [5,2; 15,3]$	$\Omega_o \in [5,2; 13,1]$	$\Omega_o \in [5,2; 12,8]$	$\Omega_o \in [6,1; 11,8]$
2-й	$\Omega_o \in [2,3; 12,15]$	$\Omega_o \in [2,3; 10,0]$	$\Omega_o \in [2,3; 9,85]$	$\Omega_o \in [3,0; 9,5]$

Для точного определения границ областей параметрической грубости системы с РНС была реализована процедура вычисления коэффициентов передаточной функции при заданном $D^*(s)$ и вариациях Ω_o . Результаты соответствующих расчетов для САУ электромеханическим объектом, приведен-

ным на рис. 3, при использовании в качестве $D(s)$ и $D^*(s)$ полиномов Ньютона, представлены в табл. 2.

В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены переходные характеристики системы с наблюдателем для 2-го варианта ЭМС при расчетных параметрах объекта (кривые 1) и при вариациях $K_T \pm \Delta K_T$ (кривые 2, 3), соответствующие соблюдению (а) и нарушению (б) третьего условия робастности.

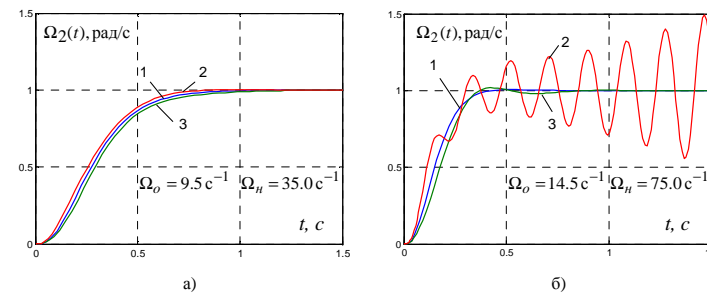


Рис. 6

Поскольку РНС, подобно динамическому ПР, является управляющим устройством “входа-выхода”, использование наблюдателя состояния дает преимущества при синтезе робастной САУ в случае удаления структуры объекта от КФУ и приближения к КФН, то есть при лучшей наблюдаемости по сравнению с управляемостью.

В целях обеспечения низкой чувствительности РНС к вариациям собственных параметров следует путем выбора формы представления наблюдателя состояний и темпа его подстройки обеспечить положительность элементов матрицы регулятора \mathbf{K}_M и матрицы подстройки наблюдателя \mathbf{L} .

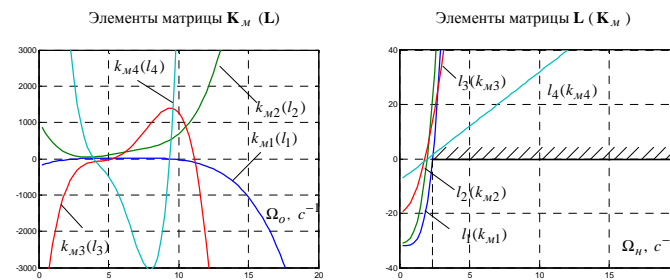


Рис. 7

Если использовать наблюдатель в КФУ и не замедлять темп процесса управления относительно динамики объекта, то элементы матрицы \mathbf{K}_M будут положительными, однако элементы матрицы \mathbf{L} могут оказаться отрицательными. Если реализовать наблюдатель в КФН, то ситуация будет обратной: элементы \mathbf{L} становятся положительными, а элементы \mathbf{K}_M могут оказаться отрицательными. Эти ситуации отражены на рис. 7 для систем управления

2-м вариантом ЭМС с наблюдателями состояния в КФН и в КФУ при использовании характеристических полиномов Ньютона.

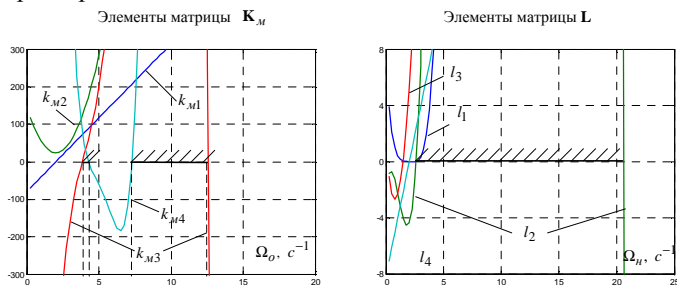


Рис. 8

Варианты системы с наблюдателями состояния в КФУ с точки зрения робастности оказываются наименее удачными. Поскольку элементы матрицы L по абсолютной величине больше значений K_M , в системе формируются глубокие положительные обратные связи.

Реализация наблюдателя состояния в КФН не меняет границ общей зоны параметрической грубости САУ, однако позволяет значительно снизить глубину положительных обратных связей при тех же значениях Ω_o и Ω_n . В результате система оказывается менее чувствительной к вариациям собственных параметров РНС.

Реализация РНС в координатах объекта управления, как правило, позволяет расширить общую зону параметрической грубости по сравнению с наблюдателями в канонических формах (рис. 8). Наиболее существенно это проявляется для объектов, структура которых равноудалена от КФУ и КФН, о чем свидетельствуют близкие значения норм матриц $\|P_U\|_1$ и $\|P_V\|_1$.

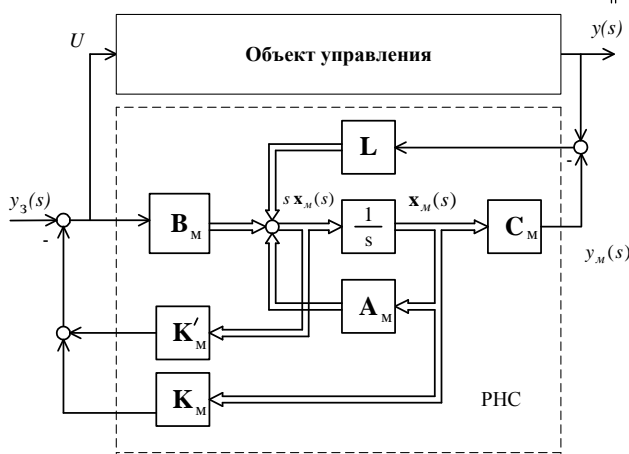


Рис. 9

Введение в структуру САУ обратных связей по производным координат наблюдателя (рис. 9) позволяет снизить чувствительность к вариациям параметров как объекта управления, так и самого РНС. Такой прием позволяет не только улучшить робастность САУ, но и

снизить статическую ошибку регулирования за счет увеличения коэффициента петлевого усиления.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке методики параметрической оптимизации САУ с регуляторами состояний различных типов на основе комплексных критериев качества управления технологическими объектами.

В соответствии с предлагаемой методикой, применяется двухэтапная процедура параметрической оптимизации САУ при выбранной структуре регулятора. На первом этапе используется метод модального управления, позволяющий определить базовые значения и диапазон вариации параметров регулятора. На втором проводится процедура параметрической оптимизации по комплексному критерию качества, отражающему основные требования к системе, с использованием детализированной модели САУ.

Применение нормированного критерия оптимальности, включающего прямые показатели быстродействия \bar{q}_1 и точности \bar{q}_2 САУ

$$\bar{q} = 1 - \sqrt{\bar{q}_1 \cdot \bar{q}_2}, \quad (7)$$

позволяет решить проблему выбора весовых коэффициентов, характерную для квадратичных функционалов. В качестве показателя быстродействия q_1 здесь принимается время нарастания переходной характеристики t_n , а в качестве показателя точности q_2 – средний модуль отклонения выходной координаты за время $t_n < t < t_n$:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{1}{(N-T)} \sum_{j=T}^N \left| \frac{y_j - y_3}{y_3} \right| \cdot 100\%,$$

где $T = t_n / T_o$ и $N = t_n / T_o$ – относительное время; t_n – время переходного процесса; T_o – период квантования. Нормирование показателей качества осуществляется с использованием функции Харрингтона.

Однако применение подобных критериев может приводить к формированию систем с близкими переходными характеристиками при существенно различающихся параметрах регулятора. Как следствие, изоповерхность функционала качества САУ приобретает вид расширяющейся трубки, что свидетельствует о плохой обусловленности задачи оптимизации. При этом варианты САУ с более глубокой обратной связью имеют меньшую параметрическую чувствительность, но требуют более мощных управляющих воздействий на объект.

В связи с этим при оптимизации САУ с регуляторами состояний предлагается использовать расширенный критерий качества, включающий в себя показатели быстродействия \bar{q}_1 , точности \bar{q}_2 , параметрической грубости

\bar{q}_3 и энергетических затрат на управление \bar{q}_4 , нормированные по шкале Харрингтона:

$$\bar{q}_m = 1 - \left(\prod_{i=1}^4 \bar{q}_i \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Показателем робастности q_3 может служить средний модуль отклонения переходной характеристики системы при вариации параметров объекта управления относительно расчетных значений:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{y_j - y_j^*}{y_j} \right| \cdot 100\%,$$

где y_j, y_j^* – значения выходной координаты при расчетных и измененных параметрах объекта. В качестве показателя энергетических затрат q_4 целесообразно принять максимальное по модулю значение управляющего воздействия на объект. В задачах оптимизации ЭМС таким показателем служит пиковое значение тока двигателя $I_{\mathcal{A}}$.

В тех случаях, когда назначение оценок “хорошо” и “плохо” на шкале Харрингтона затруднительно, следует уточнить их путем построения проекций зоны компромиссов Парето.

Параметрическая оптимизация САУ с регуляторами состояний на основе комплексных критериев качества осуществляется с использованием численных поисковых алгоритмов, реализуемых на ЭВМ. Наиболее эффективным при этом оказывается применение генетических алгоритмов, основанных на моделировании процессов естественного отбора в живой природе.

Применение расширенного критерия позволяет обеспечить компромисс между основными показателями качества системы управления электромеханическим объектом – быстродействием, точностью, робастностью, энергетическими затратами. При этом поверхность отклика функционала качества САУ приобретает четко выраженный экстремум, что обеспечивает устойчивую сходимость поисковых алгоритмов.

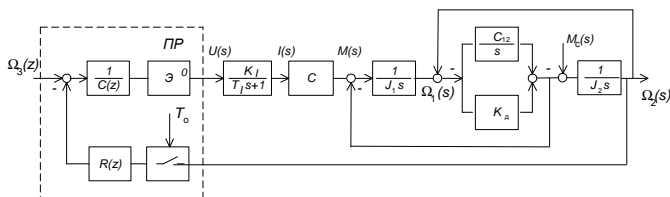


Рис. 10

В качестве примера рассматривается оптимизация двухмассовой ЭМС (рис. 10) по упрощенной модели, в которой замкнутый контур тока представлен апериодическим звеном 1-го порядка с параметрами K_I и T_I .

Для данного объекта был синтезирован минимальный ПР с тремя настраиваемыми параметрами (r_0, r_1, r_2), реализуемый в цифровой форме.

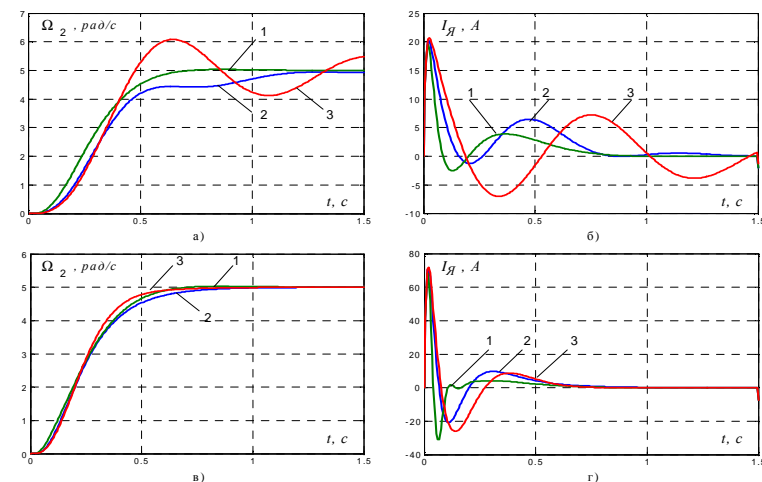


Рис. 11

На рис. 11, а, б приводятся переходные характеристики системы управления при базовой настройке ПР, на рис. 11, в, г – характеристики САУ с более глубокими обратными связями, причем кривые 1 соответствуют расчетным параметрам объекта управления, кривые 2 – увеличению момента инерции J_2 , а кривые 3 – снижению коэффициента жесткости механизма C_{12} . При близких показателях быстродействия и точности система с более глубокой обратной связью является более робастной, однако пиковое значение тока $I_{\mathcal{A}}$ для нее существенно выше.

На рис. 12, а, б для сравнения приведены изоповерхности $\bar{q} = \bar{q}_m = 0,3$ соответствующих критериев (7) и (8). Они наглядно показывают, что преимуществом критерия \bar{q}_m является наличие четко выраженного минимума, что снимает проблему обусловленности задачи оптимизации.

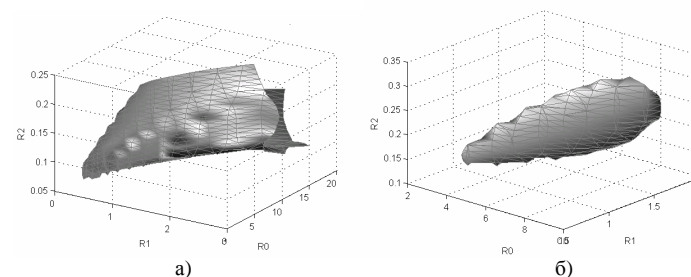


Рис. 12

Процедуры оптимизации РС с гибкими обратными связями, а также с наблюдателями состояний имеют свои особенности, что обусловлено повышенным количеством степеней свободы, а также взаимным влиянием параметров САУ. В этих условиях непосредственная вариация параметров управляющего устройства нецелесообразна, поскольку приводит к плохой обусловленности задачи оптимизации.

В задачах оптимизации систем с комбинированными РС предлагается варьировать следующие взаимно-независимые параметры нормированных характеристических полиномов $D(s) = s^n + d_{n-1}\Omega_o s^{n-1} + \dots + d_1\Omega_o^{n-1}s + \Omega_o^n$ и $D^*(s) = s^n + d_{n-1}\Omega_o^* s^{n-1} + \dots + d_1\Omega_o^{*n-1}s + \Omega_o^{*n}$:

- среднегеометрический корень Ω_o^* “ускоренного” полинома $D^*(s)$;
- среднегеометрический корень Ω_o заданного полинома $D(s)$;
- нормированные коэффициенты указанных полиномов d_1, d_2, \dots, d_{n-1} .

При таком подходе на каждом шаге оптимизационной процедуры удобно рассчитывать значения элементов матриц комбинированного РС методом модального управления.

В процессе оптимизации систем управления с РНС следует варьировать аналогичные параметры нормированных полиномов $D(s)$ и $D^*(s)$:

- среднегеометрический корень Ω_n полинома подстройки $D^*(s)$;
- среднегеометрический корень Ω_o заданного полинома $D(s)$;
- нормированные коэффициенты полиномов d_1, d_2, \dots, d_{n-1} .

На каждом шаге поискового алгоритма при этом удобно рассчитывать значения матриц \mathbf{K}_M и \mathbf{L} с использованием уравнений синтеза (5) и (6).

Для обеспечения надежной сходимости поисковых процедур при оптимизации систем с комбинированными РС и с РНС в состав комплексного критерия (8) рекомендуется включать показатель помехоустойчивости. В качестве такого показателя может служить величина среднеквадратического отклонения координаты, наиболее подверженной влиянию помех, в установившемся режиме $q_5 = \bar{\sigma}_{nl}$. Применительно к ЭМС при вычислении показателя q_5 целесообразно использовать ток якорной цепи двигателя:

$$\bar{\sigma}_{nl} = \sqrt{\frac{1}{NN - N} \sum_{j=N}^{NN} (I_{Яj} - \bar{I}_{Я})^2},$$

где N и NN – относительные время переходного процесса и длительность наблюдения; $\bar{I}_{Я}$ – среднее значение тока якоря в установившемся режиме; j – номер отсчета.

По сравнению с исходными вариантами САУ, полученными методом модального управления, оптимальная система представляет собой компромисс-

ное решение, обладающее достаточно низкой чувствительностью к воздействию помех при высокой робастности и заданных динамических характеристиках.

Пятая глава диссертации посвящена разработке и исследованию методов автоматической настройки систем управления с регуляторами состояний различных типов.

На начальном этапе проводилось исследование эффективности численных методов оптимизации при решении задач настройки САУ с регуляторами состояний базовых типов. Среди градиентных был выбран метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла (ДФП), среди поисковых – метод деформируемого симплекса (Нилдера-Мида). В качестве критерия оптимальности применялся комплексный показатель качества САУ, сформированный на этапе параметрической оптимизации.

Как было установлено, применение рекуррентных алгоритмов оптимизации в задачах настройки САУ с регуляторами состояния осложняется большим количеством опытов на реальном объекте, влиянием начальных условий на результат настройки, плохой обусловленностью целевой функции, появлением локальных экстремумов при воздействии помех.

В целях преодоления указанных трудностей и обеспечения устойчивой сходимости рекуррентных алгоритмов и сокращения длительности настройки предлагается использовать эталонную модель САУ, сформированную на этапе параметрической оптимизации. При этом критерием качества настройки служит мера отклонения переходной характеристики САУ y_j от

характеристики эталонной модели $y_j^{\text{э}}$ в соответствующие моменты времени:

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |y_j - y_j^{\text{э}}|, \quad (9)$$

где $N = T_n / T_o$ – относительное время переходного процесса; j – номер отсчета. Эталонная модель САУ реализуется в виде системы разностных уравнений или в табличной форме.

Применение эталонных моделей при настройке САУ с безынерционным РС и с динамическим ПР позволяет сформировать поверхность отклика с четко выраженным минимумом. Это обеспечивает устойчивую сходимость как градиентных, так и поисковых алгоритмов оптимизации, в том числе при воздействии нелинейных факторов и помех, характерных для реальных электро-механических объектов.

Для дальнейшего снижения числа опытов при настройке систем с регуляторами состояния предлагается использовать априорную информацию в виде структуры и ряда известных параметров объекта управления. Это позволяет варьировать в процессе настройки относительно небольшое количество неиз-

вестных параметров объекта (как правило 2-3), что существенно снижает размерность задачи оптимизации.

При таком подходе на каждой итерации алгоритма настройки должен выполняться расчет параметров регулятора состояния, для чего целесообразно использовать метод модального управления. В качестве желаемого характеристического полинома в данном случае следует использовать знаменатель передаточной функции эталонной модели САУ.

В задачах настройки САУ электромеханическими объектами целесообразно варьировать неизвестные параметры механической части (C_{12} , J_2), поскольку параметры силового преобразователя и двигателя в большинстве случаев известны.

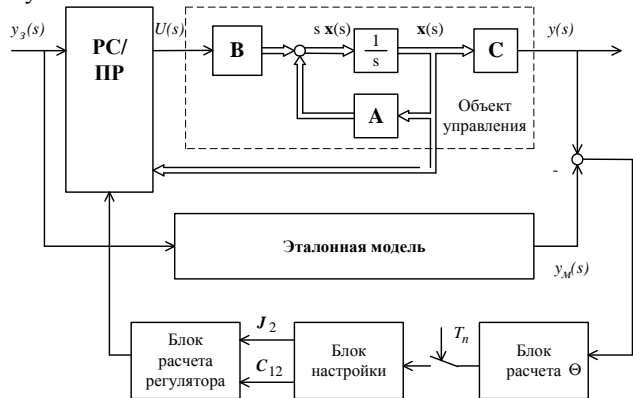


Рис. 13

Структурная схема предлагаемого метода настройки САУ с регулятором состояния приведена на рис. 13. Блок расчета критерия обеспечивает вычисление значения θ по формуле (9) на интервале времени T_n . Блок настройки определяет новые значения варьируемых

параметров системы (C_{12} , J_2), минимизирующих величину θ , в соответствии с принятым алгоритмом оптимизации. На основе этих оценок блок расчета осуществляет параметрический синтез регулятора путем решения уравнений (3) для безынерционного РС или (4) для динамического ПР.

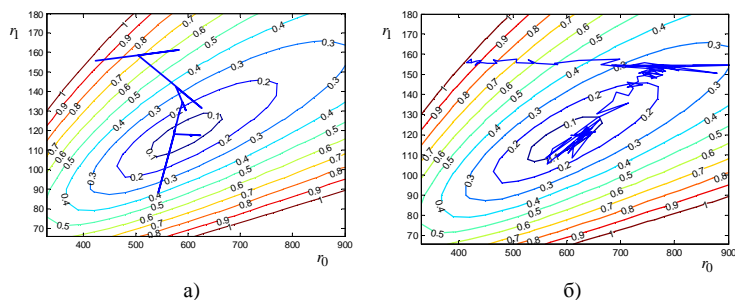


Рис. 14

Предлагаемый подход, состоящий в снижении размерности задачи оптимизации за счет использования априорной информации об объекте управления, а также применении эталонной модели САУ позволяет существенно сократить длительность настройки. В частности, настройка системы управления двухмассовой ЭМС с динамическим ПР требует 20-60 итераций при использовании метода ДФП (рис. 14, а) и 40-80 итераций при использовании метода деформируемого симплекса (рис. 14, б).

Задача автоматической настройки систем управления с наблюдателями состояния усложняется большим числом переменных параметров РНС, а также взаимным влиянием этих параметров. В связи с этим непосредственная вариация параметров РНС в процессе настройки, как правило, нецелесообразна.

Предлагаемый метод настройки систем управления с РНС основан на вариации ненулевых элементов матриц наблюдателя состояния – A_M , B_M и C_M (рис. 15). В каждом цикле настройки после изменения параметров наблюдателя выполняется расчет методом модального управления матриц регулятора K_M и L по формулам (5) и (6) на основе характеристических полиномов $D(s)$ и $D^*(s)$, полученных на этапе оптимизации САУ.

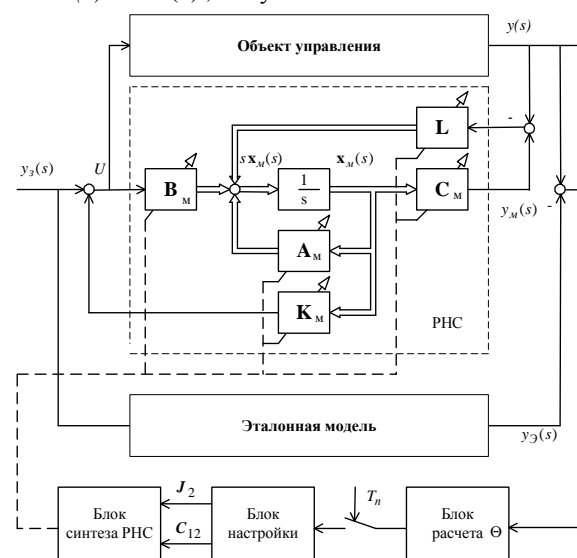


Рис. 15

В качестве критерия качества настройки системы с РНС, как и в случае РС базовых типов, целесообразно использовать меру (9) отклонения сигнала на выходе объекта управления от сигнала эталонной модели, сформированной на этапе структурно-параметрической оптимизации САУ.

Предлагаемый подход позволяет снизить размерность задачи оптимизации и обеспечить устойчивую сходимость процессов настройки

систем управления с РНС при использовании как градиентных, так и поисковых алгоритмов оптимизации.

В целях дальнейшего снижения времени настройки регуляторов до минимально возможного значения, равного длительности переходного процесса в

САУ, предлагается интеллектуальный метод, основанный на применении искусственной нейронной сети (рис. 16). По динамической характеристике САУ во временной или частотной области ИНС проводит идентификацию параметров объекта управления. На основе полученных оценок выполняется расчет скорректированных параметров регулятора состояния, для чего используется метод модального управления.

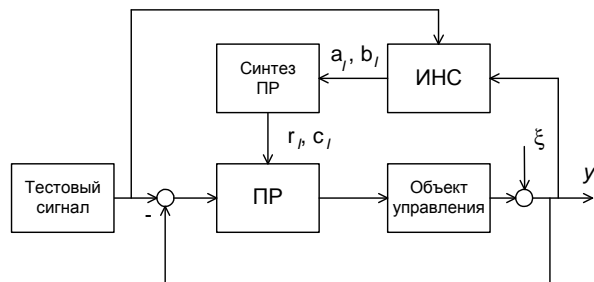


Рис. 16

Для решения задачи параметрической идентификации линеаризуемых САУ целесообразно использовать радиальные ИНС (рис. 17), наиболее эффективно проводящие классификацию данных. В таких ИНС каждый нейрон реагирует на определенный вид динамической характеристики объекта, что облегчает формирование оптимальной структуры сети.

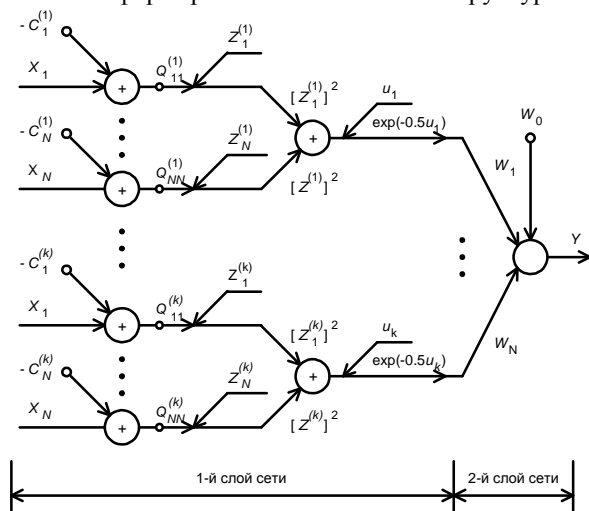


Рис. 17

стройкой является наличие таких нелинейностей, при которых система не может быть адекватно представлена линеаризованной моделью. Кроме того, при воздействии интенсивных помех погрешность идентификации параметров

объекта управления возрастает, что может приводить к снижению качества настройки системы.

Шестая глава диссертации посвящена вопросам практической реализации и экспериментального исследования разработанных методов оптимизации и настройки систем управления с регуляторами состояния.

Практическая реализация разработанных САУ на основе регуляторов состояния и алгоритмов автоматической настройки была выполнена в цифровой форме, с использованием программируемых микропроцессорных контроллеров и управляющих ЭВМ, а также операционных систем реального времени. Такой подход позволяет снять ряд ограничений, характерных для аналоговых систем автоматического управления.

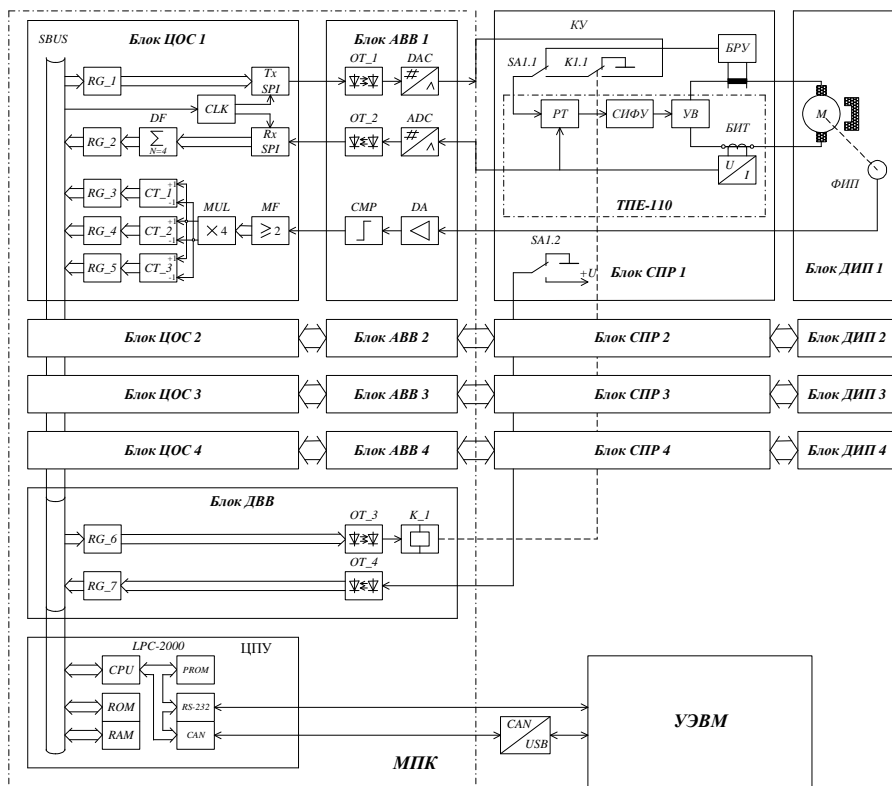
Практическая реализация и исследования эффективности САУ электромеханическими объектами с регуляторами состояния, а также алгоритмов автоматической настройки проводились на базе специально разработанного экспериментального стенда. Экспериментальный стенд, структура которого приведена на рис. 18, состоит из 4-х идентичных каналов управляемого электропривода, содержащих двигатели постоянного тока ДК-1.7, силовые преобразователи ТПЕ-110, измерительные преобразователи угловых перемещений и токов. Взаимодействие между каналами стенда, а также реализация цифровых регуляторов обеспечивается общей микропроцессорной системой управления, реализованной на основе однокристального микроконтроллера серии LPC-2000 с ядром ARM7TDMI.

На базе экспериментального стенда была реализована физическая модель двухмассовой ЭМС с вязкоупругой связью между массами, а также варианты цифровых регуляторов состояния – безынерционных РС, динамических ПР и регуляторов с наблюдателями состояния. Это позволило проводить исследования эффективности алгоритмов настройки САУ при различных параметрах объекта управления.

В связи со сложностью разработанных алгоритмов автоматической настройки при реализации была принята следующая концепция разделения задач между компонентами микропроцессорной системы управления экспериментальным стендом.

Задачи моделирования двухмассовой ЭМС и реализации цифровых регуляторов состояния в режиме реального времени возложены на микропроцессорный программируемый контроллер. При этом используются возможности операционной системы реального времени и языка высокого уровня Forth, позволяющей выполнять параллельно до 8 задач с интервалом квантования 0,004 с.

Более сложные в вычислительном смысле задачи расчета параметров регулятора, реализации алгоритмов поиска оптимума и эталонной модели САУ, а также отображения результатов эксперимента реализуются на ЭВМ с использованием возможностей комплекса MatLab.



МПК – микропроцессорный контроллер; ЦОС – блок цифровой обработки сигнала; ДВВ – блок дискретного ввода-вывода; ЦПУ – центральное процессорное устройство; АВВ – блок аналогового ввода-вывода; СПР – блок силовых преобразователей; ДИП – блок двигателей и преобразователей; УЭВМ – управляющая ЭВМ

Рис. 18

Разработанные и реализованные на базе экспериментального стенда алгоритмы настройки САУ с регуляторами состояния оказались работоспособными и эффективными в режиме реального времени, в условиях влияния нелинейных факторов и помех, характерных для реальных электромеханических объектов управления.

Заключение

Практическое применение существующих методов как модального, так и оптимального управления требует решения задач обеспечения робастных свойств, параметрической оптимизации и автоматической настройки на объекте управления синтезируемых САУ с регуляторами состояния.

Обеспечение робастных свойств в рамках метода модального управления осуществляется путем выбора рационального типа РС, расчета областей параметрической грубости для заданной структуры и размещения динамических характеристик САУ в соответствующем интервале. Поскольку границы указанных областей для одного и того же объекта с различными типами РС могут существенно различаться, имеются предпосылки для структурной оптимизации САУ.

Выбор наиболее рационального с точки зрения обеспечения параметрической грубости типа и структуры регулятора состояний целесообразно проводить путем оценки степени близости объекта управления к каноническим формам управляемости и наблюдаемости, для чего могут применяться нормы матриц преобразования координат объекта. Для объектов, соответствующих КФУ, целесообразно применение регуляторов с обратными связями по вектору состояний, для соответствующих КФН – управляющих устройств “входа-выхода”, которым относятся динамические ПР и РНС.

Низкая чувствительность систем управления с РНС к вариации параметров объекта достигается путем формирования темпа основного процесса управления, при котором сохраняется минимально-фазовый характер передаточной функции РНС, включенного в контур обратной связи. Для достижения низкой чувствительности РНС как динамической системы к вариациям собственных параметров следует выбором формы представления и темпа подстройки наблюдателя обеспечить положительность коэффициентов матрицы обратных связей регулятора и матрицы подстройки.

При неблагоприятной структуре объекта управления введение в систему с РС или с РНС гибких обратных связей по производным координат состояния в большинстве случаев позволяет получить непрерывную зону параметрической грубости САУ. Это не только снижает статическую ошибку регулирования, но и улучшает робастные свойства САУ за счет повышения коэффициента петлевого усиления по сравнению с традиционной системой модального управления.

В целях обеспечения высокого качества управления рекомендуется проведение дополнительной параметрической оптимизации синтезированной САУ путем вариации параметров РС в окрестностях базовых значений, полученных методом модального управления, с использованием комплексных критериев, основанных на прямых показателях качества, нормированных по шкале Харрингтона. Такие критерии позволяют обеспечить компромисс между основными техническими требованиями к САУ – быстродействию, точностью, параметрической грубостью, энергетическими затратами и помехоустойчивостью.

Эффективное решение задач автоматической настройки РС различной структуры на объекте управления возможно за счет применения алгоритмов численной оптимизации САУ в режиме реального времени либо интеллектуальных методов, основанных на использовании искусственных нейронных сетей. Применение эталонной модели, сформированной на этапе синтеза

САУ, обеспечивает устойчивую сходимость как градиентных, так и поисковых алгоритмов настройки независимо от начальных условий, влияния нелинейных факторов и помех. Дальнейшее снижение числа опытов и длительности настройки возможно за счет использования априорной информации о структуре и значениях параметров объекта управления.

Интеллектуальный метод, основанный на идентификации объекта управления при помощи искусственной нейронной сети с последующим расчетом параметров РС, например методом модального управления, позволяет значительно сократить длительность настройки САУ. Однако такой подход требует значительного объема априорной информации об объекте управления в виде диапазона изменения параметров и характеристик возмущающих воздействий.

Предложенные методы и подходы объединены в рамках общей методики структурно-параметрического синтеза, оптимизации и настройки САУ с регуляторами состояний различных типов. Разработанные алгоритмы реализованы в форме комплекса программных средств, позволяющих автоматизировать наиболее трудоемкие процессы параметрической оптимизации и настройки САУ на объекте управления.

Степень решения поставленных задач и уровень полученных результатов, определяющих развитие методов робастного синтеза, параметрической оптимизации и автоматической настройки САУ в направлении обеспечения высоких динамических и статических показателей качества управления технологическими объектами, свидетельствуют о достижении цели диссертационной работы.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

Статьи в изданиях по перечню ВАК РФ

1. *Анисимов, А.А.* Методы параметрической оптимизации полиномиальных регуляторов электромеханических систем / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Электричество*. – 2008. – №3. – С. 52-58.
2. *Анисимов, А.А.* Автоматическая настройка полиномиальных регуляторов электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2008. – №8. – С.13-18.
3. *Анисимов, А.А.* Формирование критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2009. – №10. – С. 36-41.
4. *Анисимов, А.А.* Идентификация электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети / А.А. Анисимов, М.Н. Горячев // *Вестник ИГЭУ*. – 2008. – №3. – С.55-58.
5. *Анисимов, А.А.* Автоматическая настройка полиномиальных регуляторов с использованием искусственной нейронной сети / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы разра-*

ботки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2008” / Сборник научных трудов. – М.: ИППМ РАН, 2008. – С. 98-101.

6. *Анисимов, А.А.* Параметрическая оптимизация и настройка цифровых регуляторов состояния / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин, В.В. Аполонский // *Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010” / Сборник научных трудов. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 482-487.*

7. *Анисимов, А.А.* Анализ параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния / А.А. Анисимов, Д.Г. Котов, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. – 2011. – №5. – С. 18-32.

8. *Анисимов, А.А.* Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. – 2012. – №5. – С. 3-14.

9. *Тарарыкин, С.В.* Методика проектирования цифровых полиномиальных регуляторов электромеханических систем / С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков, Н.В. Салахутдинов, А.А. Анисимов // *Вестник ИГЭУ*. – 2005. – №3. – С.24-35.

Другие публикации по теме диссертации

10. *Анисимов, А.А.* Методика автоматической настройки полиномиальных регуляторов электромеханических систем / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Материалы Международной научно-технической мультikonференции “Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники – 2007”*. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – С. 195-197.

11. *Анисимов, А.А.* Формирование критерия оптимальности в задачах синтеза полиномиальных регуляторов электромеханических систем / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Материалы 2-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – С.-Петербург, ОАО Концерн ЦНИИ “Электроприбор”, 2008. – С. 21-24.*

12. *Анисимов, А.А.* Автоматическая настройка регуляторов состояния с использованием искусственной нейронной сети / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Материалы Международной научно-технической мультikonференции “Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники – 2009”*. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 195-197.

13. *Анисимов, А.А.* Структурно-параметрический синтез робастных систем модального управления / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции “Мехатроника, автоматизация, управление – 2010”*. – С.-Петербург, ОАО Концерн ЦНИИ “Электроприбор”, 2010. – С. 49-52.

14. *Анисимов, А.А.* Анализ и синтез параметрически грубых систем с комбинированными регуляторами состояния / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин, В.В. Аполонский // *Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. Т. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 19-22.*

15. *Анисимов, А.А.* Методы автоматической настройки регуляторов с наблюдателями состояния электромеханических систем / А.А. Анисимов, В.В. Аполонский // *Материалы докладов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения)*. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2011. – С. 219-222.

16. *Анисимов, А.А.* Автоматическая настройка регуляторов с наблюдателями состояний электромеханических систем / А.А. Анисимов // *Труды VII Международной научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина»*. – Иваново, 2012. – С. 105-109.

Статьи в зарубежных изданиях

17. *Anisimov, A.A.* Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers / A.A. Anisimov, D.G. Kotov, S.V. Tararykin, V.V. Tyutikov // *Journal of Computer and System Sciences International*. – 2011. – Vol. 50. – №5.– pp. 698–719.

18. *Anisimov, A.A.* Peculiarities of Synthesis of Parametrically Robust Modal Control System with State Observers / A.A. Anisimov, S.V. Tararykin // *Journal of Computer and System Sciences International*. – 2012. – Vol. 51. – №5.– pp. 617–627.

Свидетельства о государственной регистрации программ

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011614853. Программный комплекс для расчета полиномиальных регуляторов и регуляторов состояния “Sputnik” / В.В. Аполонский, А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011 г.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012611287. Программа для определения области устойчивости систем автоматического управления “Skyeyes” / В.В. Аполонский, А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.01.2012 г.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012617024. Программа для автоматической настройки безынерционных и динамических регуляторов состояния “AutoTuner” / В.В. Аполонский, А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.08.2012 г.

АНИСИМОВ Анатолий Анатольевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА, ОПТИМИЗАЦИИ И НАСТРОЙКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 05.07.2013. Формат 60×84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 2,09.

Тираж 100 экз. Заказ № 150

ФГБОУ ВПО “Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина”

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.